Ing. Albert Bradáč

PŘÍČNÉ PŘEMÍSTĚNÍ VOZIDEL PŘI ANALÝZE SILNIČNÍ NEHODY

V příspěvku jsou prezentovány výsledky disertační práce autora, zabývající se analýzou současného stavu možností výpočtu času potřebného na příčné přemístění vozidla (například při změně jízdního pruhu, náhlém vybočení z důvodu vyhýbání se překážce apod.) včetně porovnání stávajících metod. Prezentovány jsou výsledky rozsáhlých provedených měření příčného přemístění při extrémním manévru i při jízdě v běžném provozu. Odvozena je hraniční rychlost, pod kterou čas na příčné přemístění nezávisí na adhezi, ale na času potřebném k ujetí dráhy ve směru jízdy. V závěru pak je doporučení standardního znaleckého postupu při výpočtu manévru příčného přemístění.

Předkládaný příspěvek se zabývá především analýzou a možnostmi modelování pohybu vozidla (v souvislosti s analýzou dopravních nehod) během tzv. vyhýbacího manévru, se zvláštním zaměřením na volbu vstupních veličin. Vyhýbacím přitom nazýváme takový manévr, při kterém se vozidlo během jízdy přemístí v rovině rovnoběžné s vozovkou ve směru kolmém ke směru původní jízdy. Takovým manévrem může být např. změna jízdního pruhu během předjíždění, náhlé vybočení z důvodu vyhýbání se překážce apod. K problematice příčného přemístění vozidla bylo již mnohé řečeno, na toto téma byla zaměřena i 10. výroční konference EVU v Brně v roce 2001, vzhledem ke komplikovanosti problému však stále chyběly jednoznačné závěry, standardně použitelné ve znalecké praxi.

Při analýze vyhýbacího manévru v souvislosti s analýzou nehodového děje zpravidla známe vzdálenost, o kterou se vozidlo přemístilo v příčném směru (tedy směru kolmém na původní směr jízdy, resp. osu vozovky). Na základě jiných podkladů určíme rychlost vozidla během manévru (jak bude později ukázáno, přesnost určení rychlosti není pro výpočet příčného přemístění nejdůležitější), stanovíme způsob přemístění a hledáme především nejkratší možný čas, za který mohlo vozidlo daný manévr zvládnout; tento je pak mezní hodnotou s tím, že delší časy jsou přijatelné.

Během období rozvoje vědeckého přístupu k analýze dopravních nehod bylo publikováno několik různých metod, jak daný manévr počítat. Jak je podrobněji rozvedeno dále, jedná se zejména o následující:

- Původní teoretický vztah pro vyhýbání jedním obloukem, nazývaný podle autora „Kovaříkův vzorec“ (1968) [2].
- Poté k tomuto provedli sérii měření Ing. Patera a Ing. Peřina a vztah upřesnili (1974).
- Dále byl vztah upraven Prof. Bradáčem na vyhýbání dvěma oblouky do směru rovnoběžného s původním – tzv. „Kovaříkův vzorec v Bradáčově úpravě“ [2].
- Prof. Kasanický ve své kandidátské disertační práci „Analýza manévru vozidla“ vytvořil pro modelování tohoto manévru matematický model a vyslovuje závěr v tom smyslu, že doposud používané metody jsou z hlediska přesnosti nevyhovující (1990) [12].
- V zahraničí je používán i vztah podle Weisse (1988) [6] a [7].

Výsledky těchto vztahů jsou při zadání shodných vstupních parametrů odlišné, proto bylo zapotřebí zahájit výzkum, který definitivně určí správný postup při modelování pohybu vozidla během vyhýbacího manévru. Za tímto účelem byla podána grantová přihláška a byla získána podpora pro grantový projekt pod číslem GAČR 103/00/0722. V rámci tohoto projektu byla pracovníky a doktorandy Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně provedena řada měření. Metodiku pro vyhodnocování těchto měření vypracoval ve své disertační práci Ing. Robert Kledus, Ph.D. [5] a na 12 měřeních tuto metodiku ověřil. K učinění konečných závěrů bylo však třeba zpracovat mnohem větší množství měření, což bylo provedeno autorem tohoto příspěvku v rámci jeho disertační práce.

Pro znaleckou praxi je důležité, který z používaných postupů je správný (tj. dává výsledky srovnatelné se skutečností), což dosud nebylo jednoznačně objasněno. Proto toto téma bylo hlavním cílem práce, kterou se autor od roku 2000 zabýval. Než se dostaneme k závěrům, proveďme si malé shrnutí v současnosti používaných metod výpočtu času, potřebného pro příčné přemístění vozidla o vzdálenost y s využitelným příčným zrychlením a_{ymax}. Vždy zde budeme hovořit o přemístění dvěma oblouky, kdy vozidlo je na konci manévru ve směru rovnoběžném se směrem původní jízdy (tedy např. změna jízdního pruhu).

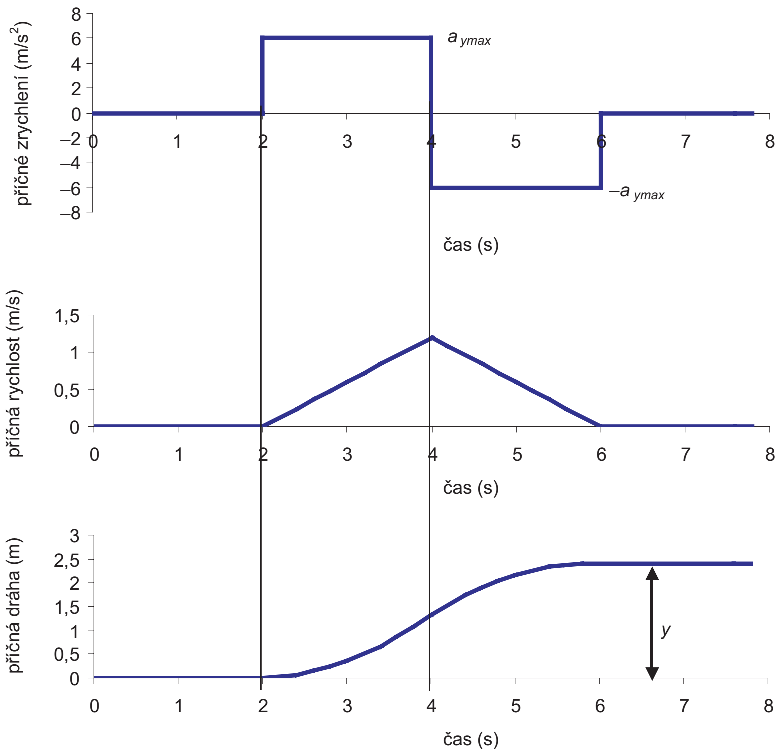
1. PRŮBĚH PŘÍČNÉHO ZRYCHLENÍ SKOKOVÝ

Zde se počítá čas, nutný pro takový manévr jako dvojnásobek času, nutného pro přemístění o polovinu dané vzdálenosti, tedy části, kdy se vozidlo příčně pohybuje pohybem rovnoměrně zrychleným. Tedy:

$$\frac{y}{2} = a_y \cdot \frac{\left(\frac{t}{2}\right)^2}{2} = \frac{a_y \cdot t^2}{8} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{4 \cdot y}{a_y}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{y}{a_y}} \qquad (1)$$

Protože ale průběh zrychlení nemůže být takto ideální, je zapotřebí hledat vztah o něco přesnější. Podíváme-li se, jaký je skutečný průběh zrychlení během takového manévru (viz obr. 2 – zde se jedná o zrychlení tzv. boční, tedy zrychlení které můžeme naměřit uvnitř vozidla, ovlivněno jeho klopením; příčné je pak

Ing. Albert Bradáč, Ústav soudního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, 602 00 Brno, Údolní 53, e-mail: junior.bradac@usi.vutbr.cz



Obr. 1 Průběh jednotlivých veličin v čase při skokovém průběhu příčného zrychlení.

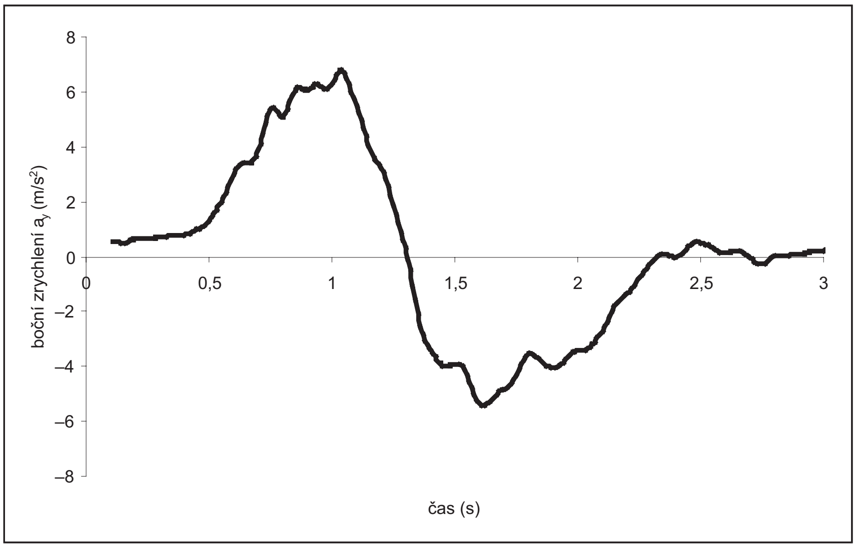
o něco menší, viz dále), můžeme vidět, že ze známých křivek, které jsme schopni definovat rovnicí, je nejvíce podobné sinusoidě.

2. PRŮBĚH ZRYCHLENÍ JE FUNKCÍ SINUS

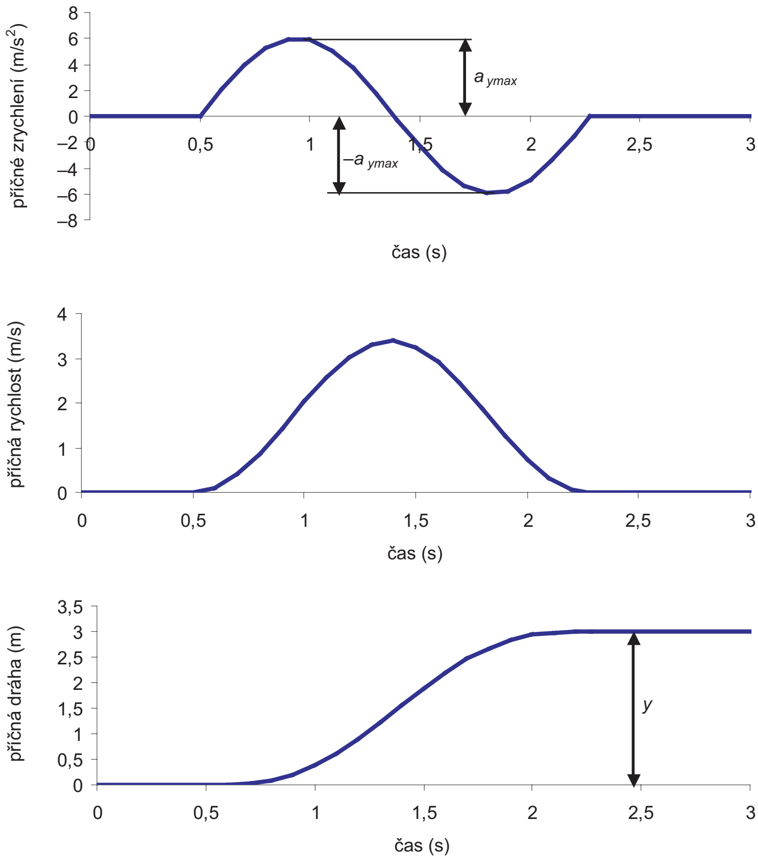
Zavedeme tedy průběh příčného zrychlení jako funkci sinus, tedy $a_y = A \cdot \sin(\omega t)$, kde amplituda A je maximální dosažitelné a_{ymax} a funkci času ω dostaneme z okrajových podmínek. Pak můžeme postupnou integrací v čase získat vztahy pro příčnou rychlost a dráhu a z nich následně pro čas:

$$t = 2{,}51\sqrt{\frac{y_{\max}}{a_{y\max}}} \tag{2}$$

Odpovídající průběh jednotlivých veličin v čase – viz obr. 3. Porovnáme-li tento vypočtený průběh zrychlení se skutečným průběhem (obr. 2), je zřejmé, že na počátku a na konci sinusoidy je zapotřebí přidat nějaký plynulý přechod (tzv. přechodnici). Právě s těmito přechodnicemi uvažuje tzv. Kovaříkův vzorec, který je v dnešní době u nás pro výpočet času pro příčné přemístění vozidla využíván. Úprava oproti odvozenému teoretickému vztahu spočívá v navýšení koeficientu před odmocninou. Experimentálně byl tento koeficient stanoven na hodnotu 3,13, tedy plné znění vztahu je:



Obr. 2 Skutečný průběh bočního zrychlení během manévru.



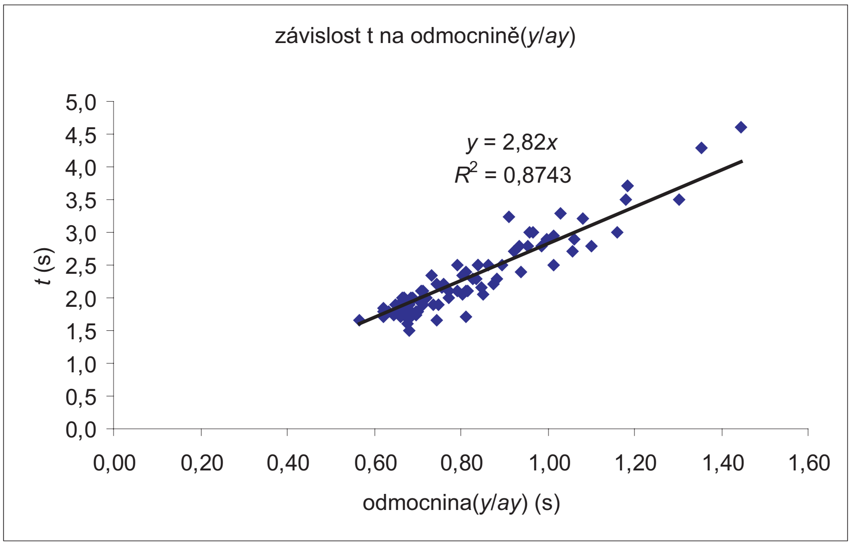
Obr. 3 Průběh veličin v čase při sinusovém průběhu příčného zrychlení.

$$t = 3{,}13\sqrt{\frac{y}{a_{y\max}}} \tag{3}$$

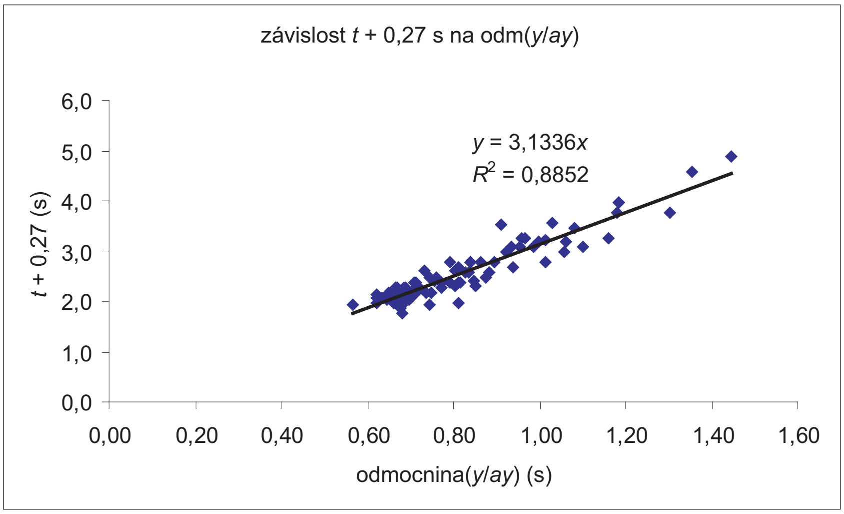
V zahraničí je též užíván tzv. Weissův vztah, který se liší opět jen koeficientem před odmocninou. Ten podle Weisse obecně není konstantní a závisí na příčném zrychlení vozidla, jeho rychlosti a dráze, o kterou je třeba se přemístit. Protože je ale většina veličin svázána s konstantami v řádech 10^{-2} až 10^{-4}, není ovlivnění příliš veliké a můžeme s nepatrným zjednodušením říci, že hodnota Weissova koeficientu je přibližně 2,67, tedy:

$$t = 2{,}67\sqrt{\frac{y}{a_{y\max}}} \tag{4}$$

Z toho je zřejmé, že tento vztah sice jakýmsi způsobem zahrnuje přechodnice (koeficient je větší než u teoretického vztahu pro sinusoidu), ale při dosazení stejných vstupních hodnot dává nižší výsledné hodnoty času pro přemístění potřebného.



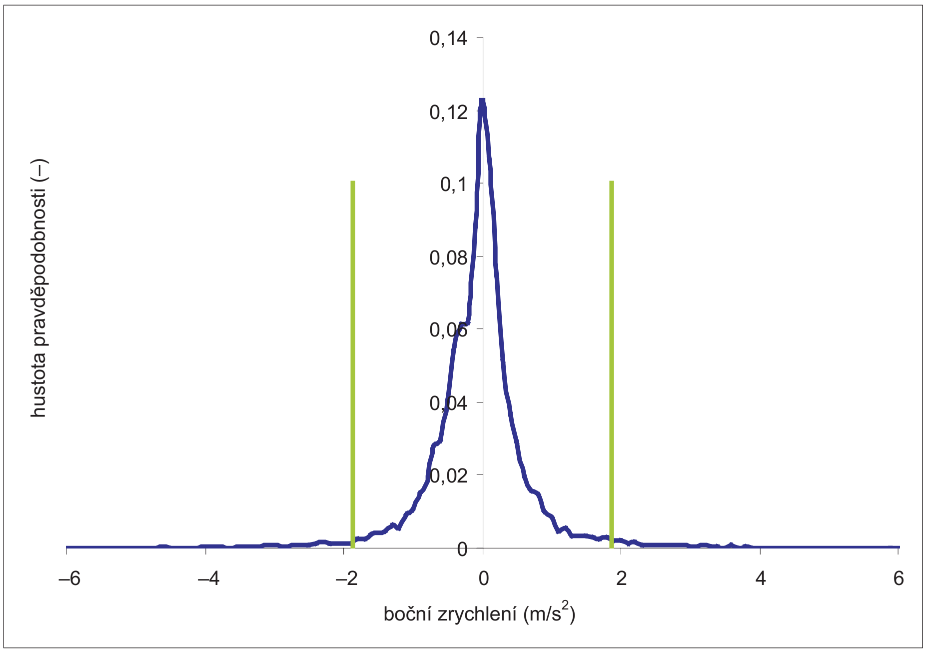
Obr. 4 Závislost času pro příčné přemístění na odmocnině $\sqrt{y/a_{y\max}}$.



Obr. 5 Závislost času (t + 0,27) s pro příčné přemístění na odmocnině (y/a_y).

Cílem disertační práce autora tedy bylo ověřit, jakou hodnotu koeficientu před odmocninou dosadit do vztahu, aby výsledky co nejvíce odpovídaly naměřeným hodnotám. K tomu autor nejprve vyhodnotil cca 90 měření s osobními vozidly na zkušebních drahách (z roku 2001) a z těchto byl vytvořen graf závislosti času, potřebného k provedení manévru, na vztahu $\sqrt{y/a_{y_{\max}}}$. Touto závislostí pak byla na základě metody nejmenších čtverců proložena odpovídající regresní přímka tak, aby procházela počátkem souřadného systému. Z rovnice této přímky je patrný hledaný koeficient (viz obr. 4). Hodnota spolehlivosti takto proložené přímky je téměř 90 %. K vyhodnocení těchto měření byla užita metodika, vypracovaná a ověřená Ing. Robertem Kledusem, Ph.D. v rámci jeho disertační práce [5].

Z toho by se mohlo zdát, že koeficient leží někde mezi Weissovým a Kovaříkovým vztahem. Je však zapotřebí rozhodnout, zda nás zajímá čas manévru od okamžiku, kdy již vozidlo vykazuje hodnoty příčné rychlosti, či od okamžiku počátku natáčení volantu řidičem. Mezi těmito okamžiky je prodleva, což je doba nutná pro vymezení vůlí v řízení, tuhosti pneumatiky apod. Podle Ing. Roberta Kleduse Ph.D., který se touto problematikou zabýval také a který vyhodnocoval ta měření, kde bylo užito kromě jiných měřidel i tzv. měřicího volantu, je tato doba v rozmezí 0,2 až 0,3 sekundy. Průměrná hodnota z vyhodnocených měření je pak přibližně 0,27 sekundy. Čas, který je vynesen do grafu (obr. 1) je čas čistého manévru, tedy bez této počáteční prodlevy. Abychom tedy získali závislost pro čas od počátku natáčení volantu po dokončení manévru (tedy okamžiku, kdy se vozidlo dále příčně nepřemisťuje, jede přibližně rovnoběžně s původním směrem), je zapotřebí dobu prodlevy připočíst a závislost vypočíst znovu (viz obr. 5). Jak je vidět, vypočtený koeficient je v dobré shodě s původním Kovaříkovým vztahem.



Obr. 6 Histogram četnosti využívaného příčného zrychlení při běžném provozu.

Nyní zbývá jen otázka dosazovaných hodnot příčného zrychlení a_y. Z fyzikálních zákonů je zřejmé, že toto zrychlení nemůže nikdy překročit hodnotu, danou dosažitelnou adhezí dané pneumatiky na daném povrchu. To však není jediná podmínka. Dosazovaná hodnota tohoto zrychlení by měla odpovídat také způsobu jízdy, se kterým při řešení pohybu vozidla uvažujeme. Na zkušebních drahách se řidiči, kteří již několik jízd absolvovali, dostali skutečně až téměř k hodnotám, odpovídajícím dosažitelné adhezi (8 m/s^2), avšak běžný řidič bez předchozího tréninku by si ani na zkušební dráze na takovou jízdu netroufl. Na rozdíl od zkušební dráhy, kde má řidič jistotu, že pokud manévr nezvládne, nestane se nic horšího, než že povalí několik kuželů, je v reálném provozu vystaven psychickému tlaku prostředí.

Z uvedených důvodů byla na Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně provedena řada měření při běžném provozu, a to různými metodami. Vyhodnocením těchto měření bylo zjištěno, že při běžné jízdě využívají řidiči tak malých hodnot příčného zrychlení, že většinou nebyly ani měřitelné a byly maskovány chvěním karoserie (měřicí zařízení bylo vždy umístěno ve vozidle a tudíž spjato s karoserií). Nejlepší výsledek, kterého bylo dosaženo, bylo vyhodnocení několika měření souvislé jízdy, kdy nebyly rozlišovány jednotlivé manévry (tzn. že se ve vyhodnocení odrazily i hodnoty získané např. při průjezdu zatáčkou). Z takto vyhodnocených dat bylo zjištěno, že drtivá většina dosahovaných hodnot bočního zrychlení se pohybuje do 2,0 m/s^2 (zde přepočet na zrychlení příčné nemá na výsledek velký vliv), mezní hodnoty při razantnějších manévrech dosahovaly výjimečně až do 4,0 m/s^2. Histogram četností jednotlivých naměřených hodnot – viz obr. 6, v němž svislé přímky vymezují interval ± 2,5σ (směrodatné odchylky) od střední hodnoty, kde leží 98,76 % všech hodnot.

Dalším dílčím problémem, kterým se autor v disertační práci zabýval, byla možnost využití běžně dostupných měřicích přístrojů pro změření využívaného příčného zrychlení v konkrétní situaci. Takovým přístrojem je např. XLmeter, Motometr, E-Tanu apod. Všechny tyto přístroje jsou při měření umístěny uvnitř vozidla a jak zde již bylo zmíněno, jsou hodnoty, které naměří, ovlivněny klopením vozidla. Toto ovlivnění je dvojího druhu. Jednak je do hodnoty skutečného příčného zrychlení připočítávána složka zrychlení tíhového v závislosti na okamžitém úhlu naklopení a jednak je připočítáváno (či odečítáno – to závisí na směru úhlového pohybu) zrychlení vyvolané úhlovým zrychlením vlastního klopení na rameni odpovídajícím výšce přístroje nad resp. pod osou klopení vozidla. Polohu osy klopení vozidla zpravidla sice neznáme a není tudíž možné tuto hodnotu z provedených měření vysledovat, ale protože nás pro dosazování do Kovaříkova vzorce zajímá pouze maximální dosažená hodnota (resp. aritmetický průměr absolutních hodnot nejvyšší a nejnižší naměřené hodnoty), nemusí nás toto druhé ovlivnění zajímat. Díky jeho závislosti na úhlovém zrychlení klopení, které je v okamžiku dosažení maximální hodnoty příčného zrychlení a tedy teoreticky i maximální hodnoty naklopení nulové, je v tomto okamžiku nulové i toto ovlivnění. Z vyhodnocených měření byla tedy vysledována závislost okamžitého úhlu naklopení na okamžitém příčném zrychlení a bylo zjištěno, že se u jednotlivých vozidel pohybovala v rozmezí 0,2 až 0,5 °/m.s^{-2}. Tedy abychom z bočního zrychlení, naměřeného ve vozidle, získali zrychlení příčné (v rovině rovnoběžné s vozovkou), je zapotřebí od každého jednoho m/s^2 odečíst složku tíhového zrychlení odpovídající sin (0,3° až 0,6°), což je 0,05 až 0,10 m/s^2, tedy 5 až 10 %.

Závěrem lze shrnout, že pro výpočet času pro příčné přemístění vozidla lze užít stávající vztah podle Kovaříka s tím, že bylo ověřeno, že takto vypočtený čas v sobě již zahrnuje prodlevu od prvního natočení volantu do odezvy vozidla v podobě nárůstu příčné rychlosti resp. příčného zrychlení. Dosazované hodnoty příčného zrychlení by se měly pohybovat v rozmezí do 2,0 m/s^2 pro běžnou klidnou jízdu, do 4,0 m/s^2 pro sportovnější jízdu. Pro vyhýbání se náhlé překážce v kritické situaci lze dosazovat i hodnoty o něco málo vyšší, pokud však nedošlo ke smyku, nesmí hodnota překročit zrychlení odpovídající dosažitelné adhezi dané pneumatiky na daném povrchu.

Dosud zmiňované metody výpočtu času, potřebného pro příčné přemístění však nelze užít vždy. U malých rychlostí může dojít k tomu, že vozidlo v takto stanoveném čase nebude schopno danou rychlostí projet dráhu, nutnou pro vykonání manévru. Při zavedení jistých zjednodušení můžeme stanovit takovou hraniční rychlost, pod kterou již není možné Kovaříkův vztah použít. Zidealizujeme-li tvar trajektorie pohybu vozidla během manévru na dva na sebe navazující kruhové oblouky o poloměru *R,* pak platí, že nejkratší délka této trajektorie je dána právě tímto poloměrem *R* a celkovou šířkou přemístění *y*. Nejmenší poloměr R je dán buď konstrukcí vozidla, nebo adhezními podmínkami, kdy jej určíme ze vztahu pro mezní rychlost v rovinném neklopeném oblouku ve vodorovné rovině.

$$R = \frac{v^2}{\mu_y \cdot g} = \frac{v^2}{a_y} \tag{5}$$

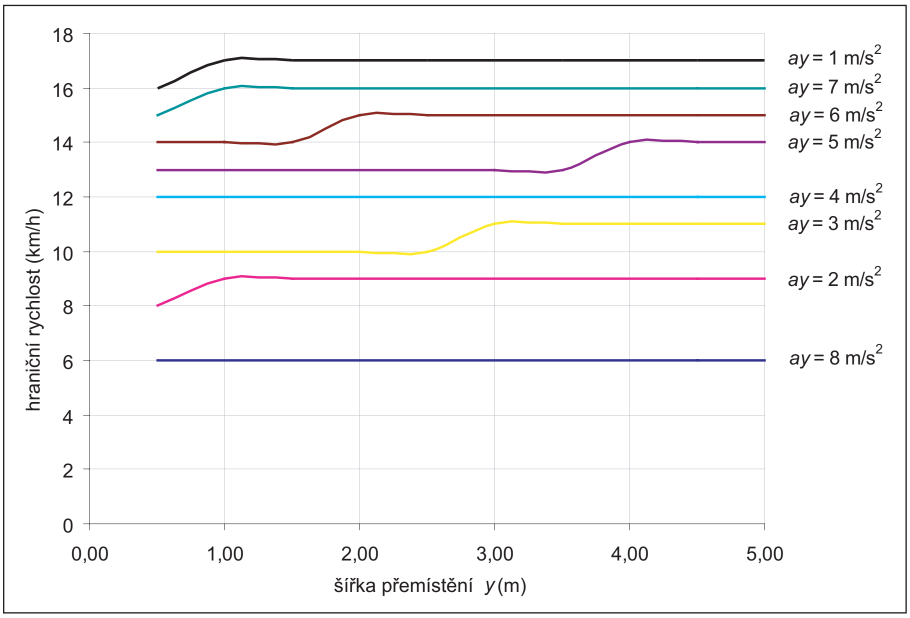
Pro další výpočet použijeme větší z obou poloměrů. Při známém *y* – tedy šířce, o kterou se má vozidlo přemístit – a známém poloměru *R* určíme úhel, který vymezuje využitou délku jednoho z kruhových oblouků a následně určíme i tuto délku, která je současně polovinou hledané délky trajektorie. Výsledný vztah je pak:

$$L = 2 \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R - y/2}{R}\right) \tag{6}$$

Následně vypočteme čas nutný pro projetí dráhy *L* danou rychlostí *v* a tento porovnáme s časem stanoveným podle Kovaříka. Je-li čas podle Kovaříka nižší, znamená to, že jej nemůžeme použít a je nutné počítat pohyb konstantní rychlostí po trajektorii. Pokud provedeme výpočet pro různé rychlosti, můžeme najít takovou hraniční rychlost, která odděluje oblast použití Kovaříkova vztahu a oblast, kde je nutné počítat s trajektorií. Na obrázku 7 jsou tyto hraniční rychlosti vypočteny v závislosti na šířce *y* pro různé hodnoty využívaného příčného zrychlení a_y.

Další možností je využít pro volbu a_y graf na obr. 23.6.9 str. 385 v [1], kdy pro malé rychlosti jsou doporučovány tak malé hodnoty a_y, že čas vypočtený s těmito hodnotami pomocí Kovaříkova vztahu je dostatečný pro projetí příslušné odpovídající dráhy. Platnost tohoto grafu je však zapotřebí ověřit jízdními zkouškami, protože např. v oblasti vysokých rychlostí doporučuje nižší hodnoty, než jsou běžně v provozu využívány.

Dále byla za spolupráce studentů kursů technického znalectví na ÚSI a doktorandů oboru „Soudní inženýrství“ zjišťována závislost využívaného příčného zrychlení na rychlosti vozidla. Protože ale hodnoty byly získány různými metodami, kdy ne vždy byla



*Obr. 7 Hraniční rychlosti použití Kovaříkova vzorce k výpočtu času nutného pro příčné přemístění vozidla pro různé šířky přemístění **y** a různá využívaná příčná zrychlení $\boldsymbol{a}_y$.*

zajištěna přesnost takového měření a často bylo měření subjektivně závislé na tom, kdo je prováděl, lze obrázek 8 brát jen jako jakési přiblížení.

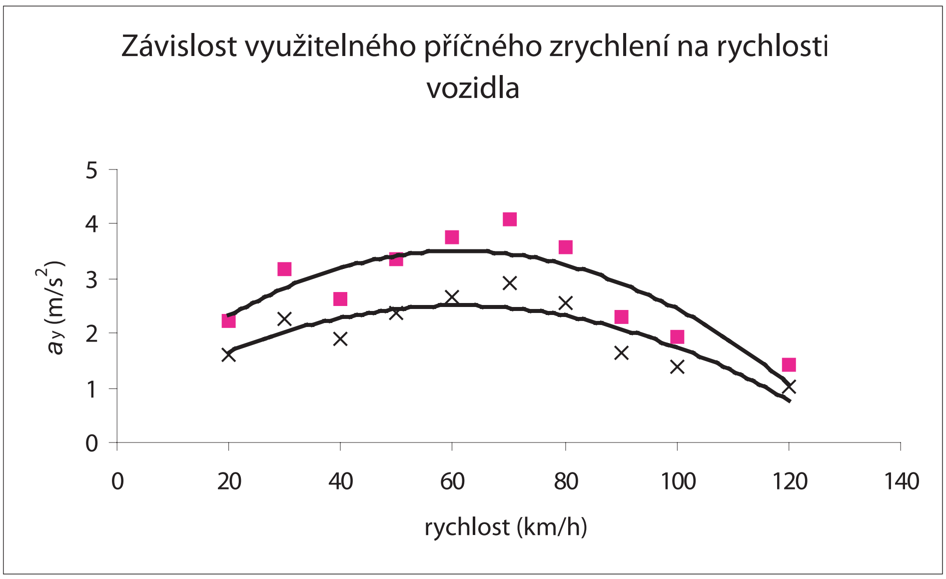
Doporučený postup při výpočtu času pro příčné přemístění

Na základě vyhodnocení provedených měření, výpočtů a dalších zjištění navrhuji pro analýzu příčného přemístění dvěma oblouky, resp. zjištění potřebného resp. minimálního času pro tento manévr následující postup:

1. Zjistit šířku *y*, o kterou se vozidlo během manévru přemístilo.
2. Stanovit způsob přemístění (plynulá jízda, dynamická jízda, kritické vyhýbání náhlé překážce).
3. Na základě zanechaných stop resp. dalších skutečností stanovit rychlost pohybu vozidla během manévru.
4. Zvolit vhodné využité příčné zrychlení a_{ymax}. Pro plynulou jízdu by tato hodnota neměla překročit 2 m/s^2, pro sportovní dynamičtější jízdu max. 4 m/s^2, pokud byly na místě zanechány vozidlem stopy po tomto manévru, lze jít až na hodnotu odpovídající adhezi v daném místě. U malých rychlostí (do 20 km/h) je možné hodnotu a_{ymax} odečíst z grafu na obr. 23.6.9 str. 385 v knize Soudní inženýrství [1].
5. Získané hodnoty příčného zrychlení a šířky *y* dosadit do Kovaříkova vzorce:

$$t = 3{,}13\sqrt{\frac{y}{a_{y\max}}}$$

Pro ověření je možné provést jízdní zkoušku se shodným typem vozidla a změřit hodnotu využitého příčného zrychlení. Bude-li



Obr. 8 Závislost využívaného příčného zrychlení na rychlostí vozidla při běžném provozu.

k měření využito zařízení umístěného ve vozidle, je vhodné naměřenou hodnotu o cca 5 % (pro vozidla s tuhou pružicí a tlumicí soustavou) až 10 % (pro vozidla s měkkou pružicí a tlumicí soustavou) snížit na hodnotu příčného zrychlení bez vlivu klopení karoserie vozidla.

Výpočty by měly být provedeny v rozmezí vstupních hodnot, protože však hledáme nejkratší možný čas pro daný manévr a každý delší je tedy technicky přijatelný, zpravidla postačí, když dosadíme z možných šířek y tu nejmenší a z možných příčných zrychlení a_y to největší přijatelné s hlediska předpokládané dynamiky manévru.

3. LITERATURA

[1] BRADÁČ A. a kol.: Soudní inženýrství. 1. vyd. *Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 1997, 719 s.* ISBN 80-7204-057-X

[2] BRADÁČ A. a kol.: Příručka znalce- analytika silničních nehod. *Dům techniky ČSVTS, Ostrava, 1985, 544 s. Publikační číslo 60/858 A/85*

[3] BRADÁČ A., KREJČÍŘ P., GLIER L., PLCH J., LUKAŠÍK L., HELEŠIC V.: Znalecký standard č. III. Technická analýza střetu vozidla s chodcem. Znalecký standard č. IV. Technická analýza nárazu vozidla na překážku. *Nakladatelství VUT, Brno, 1991, 117 s.*

[4] HÖRTZ: Požadavky na regulaci brzdové síly u automobilů. *ATZ 71, 1969*.

[5] KLEDUS R.: Modelování pohybu vozidla při analýze silničních nehod – vyhýbací manévr. *Disertační práce studia doktorského studijního programu v oboru „Soudní inženýrství“, 77 s.*

[6] WEISS E.: Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechsel-vorgängen. *VDI – Fortschritt – Berichte, 1988, Nr. 96.*

[7] WEISS E., WOSCHINI G.: Rekonstruktion von Überholvorgängen. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1986, Nr. 11, s. 303–308.*

[8] *Kasanický G.:* Súčasné a perspektívne možnosti analýzy dopravných nehôd. 1. vyd. *Žilinská univerzita v Žiline – Ústav súdneho inžinierstva, Žilina, 1999, 200 s.*

[9] PC CRASH – program. Dr. Steffan DATENTECHNIK GmbH, 1999.

[10] Handbuch CARAT Version 3. *IbB Software, 1998.*

[11] SCHIMMELPFENIG K. H., NACKENHORST U.: Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfa llrekonstruktion – Sicherheitsgrenze des Normalfahrers. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1985, Nr. 4, s. 94–96.*

[12] KASANICKÝ G.: Analýza manévru vozidla. Kandidátská disertační práce. *Žilinská univerzita v Žilině, 1990.*

[13] Kolektiv autorů: Sborník 10. výroční konference EVU. *Brno, 2001.*